

COMPRESIÓN DEL EQUILIBRIO QUÍMICO Y DIFICULTADES EN SU APRENDIZAJE

HERNANDO, MONCALEANO¹, FURIÓ, CARLOS², HERNÁNDEZ, JUAN³ y CALATAYUD, M. L.⁴

¹ Universidad Industrial de Santander. Colombia

² Universitat de València

³ IES de Enguera. Valencia

⁴ IES Sorolla. Valencia

INTRODUCCIÓN Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aprendizaje del equilibrio químico, debido a su complejidad, ha sido objeto de numerosas investigaciones en didáctica de las ciencias. Algunas de estas investigaciones han estado dirigidas a conocer si los estudiantes presentan errores conceptuales (Wheeler y Kas, 1974; Johnstone et al., 1977; Furió y Ortiz, 1983; Hackling y Garnett, 1985; Gorodetsky y Gussarsky, 1986). Otras se han preocupado de buscar explicaciones a esos errores (Bergquist y Heikkinen, 1990; Banerjee, 1991; Furió y Escobedo, 1994; Garnett et al., 1995; Quílez y Sanjosé, 1995; Van Driel et al., 1998; Furió et al., 2000). Últimamente han aparecido trabajos que atribuyen la falta de comprensión del equilibrio químico a la superposición de los niveles de representación macroscópica y microscópica de la química que habitualmente se da en la enseñanza (Garnett et al., 1995; Stavridou y Solomonidou, 2000). Todos estos trabajos han permitido detectar una gran variedad de dificultades de aprendizaje, planteándose la necesidad de establecer una jerarquización, de lo contrario se puede caer en un «conductismo» de nuevo tipo que imposibilite la incorporación de los resultados de la investigación a la enseñanza. Un criterio fundamental que puede servir de base para la selección de las dificultades en el aprendizaje de los conceptos, consiste en elegir previamente aquellos aspectos conceptuales, procedimentales y actitudinales importantes que van a servir de indicadores para caracterizar cuando podemos decir que un alumno comprende el concepto científico.

En este sentido, el problema que se plantea en este trabajo aborda, en primer lugar, qué se entiende por comprensión del equilibrio químico desde el punto de vista de la enseñanza y, a la luz de esta definición, trata de seleccionar cuáles son los principales obstáculos que se pueden presentar a los estudiantes de Química de COU en su aprendizaje.

LA COMPRESIÓN DEL EQUILIBRIO QUÍMICO Y OBSTÁCULOS EN SU APRENDIZAJE

La comprensión y el aprendizaje de conceptos científicos se puede favorecer con una enseñanza que tenga en cuenta los avances de la investigación didáctica sobre el aprendizaje de las ciencias (Furió, 1996; Carrascosa et al., 1996; Wandersee et al., 1994; Gabel, 1998; Gil, 1996). Según estos avances, son los propios estudiantes los que, apoyándose en los conocimientos que poseen, en sus intereses y experiencias, construyen activamente los nuevos conocimientos. Ahora bien, el profesor ha de tener en cuenta estos conocimientos, destrezas e intereses previos de los estudiantes y preparar, a título de hipótesis didáctica, una secuencia de contenidos y unas estrategias de enseñanza que faciliten las (re)construcciones de sus alumnos. Cuando la nueva información que reciben los estudiantes no concuerda con la estructura de conocimientos que poseen, aparece ante ellos una situación problemática cuya solución conduce a una reestructuración de sus conocimientos, que ha de ir acompañada de un cambio conceptual, metodológico y actitudinal, realizándose de este modo un aprendizaje significativo.

Los conceptos científicos son construcciones tentativas que se introducen como hipótesis para resolver determinados problemas, estando sujetos a posteriores precisiones y reformulaciones. La validez de los conceptos depende de su utilidad en un marco teórico determinado. Es decir, que sirvan para explicar y proyectar diversas situaciones y, muy especialmente, para guiar la actuación práctica. En la enseñanza de los conceptos científicos se debe evitar su introducción arbitraria, planteando en cambio situaciones problemáticas cuya solución conduzca a hacer ver la necesidad de idear dichos conceptos. En la historia de la ciencia se encuentran muchos ejemplos donde los conceptos se definen inicialmente de forma cualitativa y aproximada, después poco a poco se van acotando más hasta obte-

ner definiciones precisas que, en general, suelen incluir expresiones operativas que siempre tienen un campo de validez limitado (Carrascosa et al., 1996).

Aunque las relaciones entre enseñanza y aprendizaje son complejas (Hewson et al., 1998), es obvio que uno de los factores que más influye en el aprendizaje (y más en el caso del equilibrio químico) es el de la enseñanza (Gabel, 1998). Así pues, el análisis crítico de la secuenciación de contenidos y de las estrategias utilizadas en la enseñanza de la química nos puede decir mucho sobre la falta de comprensión en el aprendizaje del equilibrio químico.

Veamos, a continuación, cómo se justifica que los estudiantes después de estudiar el tema del equilibrio químico tengan grandes dificultades de comprensión debido a las deficiencias conceptuales, epistemológicas y actitudinales de las enseñanzas convencionales de los conceptos científicos y, en particular, a secuenciaciones que no tienen en cuenta las orientaciones constructivistas. Presentamos los aspectos más importantes a los que se debería prestar atención en el desarrollo del tema del equilibrio químico para que los estudiantes puedan comprender su significado químico.

– En primer lugar, de acuerdo con Gil (1996), las nuevas tendencias constructivistas en la enseñanza de las ciencias indican que un buen escenario que permite facilitar el aprendizaje requiere: plantear situaciones problemáticas de interés (o simplemente problemas) cuya solución justificará la necesidad epistemológica, económica o social de introducir más adelante y a título de hipótesis el nuevo concepto científico. Por tanto, unos primeros conocimientos y destrezas que permiten iniciar un buen itinerario para facilitar la comprensión del equilibrio químico serán:

1) Comprender cuál es el problema estructurante que se plantea en el estudio del equilibrio químico. Dicho en otras palabras el problema sería: ¿cómo es posible que no se produzca reacción siendo así que todavía quedan reactivos? y saber expresar significativamente, al menos, algunos ejemplos del interés que puede tener el estudio del tema en la solución de problemas personales o sociales (relaciones CTS).

Si esta introducción de conceptos se hace, como indicaba Ausubel et al. (1993), de manera arbitraria, se está favoreciendo un aprendizaje memorístico, ya que el concepto no tendrá significación lógica e interés para el estudiante. En consecuencia, las primeras dificultades con las que, en hipótesis, se van a encontrar los estudiantes serán que no tienen claro a qué problema estructurante responde la necesidad de estudiar el equilibrio químico ni tampoco van a disponer de información sobre cuestiones o ejemplos concretos de interés que se intentan resolver en el tema.

– Si pasamos al segundo aspecto resaltado en el trabajo de Gil (1996), realizar análisis cualitativos de aquellas situaciones problemáticas o problemas que permitan acotar o precisar el estudio a realizar. De aquí se derivan en el caso del equilibrio químico los siguientes conocimientos y destrezas que favorecerán su aprendizaje significativo:

2) Saber caracterizar macroscópicamente cuando un sistema químico ha alcanzado un estado de equilibrio. Lo que significa que no hay variación de las propiedades del sistema (temperatura, etc.) y, en particular, de la composición del mismo a pesar de que aún hay sustancias reactivas en el sistema y saber que el problema de estudio se limita solo a procesos reversibles. Esto es, el estudiante ha de saber que un sistema químico que reacciona solamente podrá alcanzar un estado de equilibrio, si lo hace en condiciones de reversibilidad. El objetivo principal de este estudio es saber predecir la evolución de un sistema químico. El estudiante ha de ser consciente de que el equilibrio químico no es ni un sistema ni una reacción, sino una situación o estado final al que llega el sistema en aquellas condiciones.

Normalmente la enseñanza se orienta hacia la definición «operativista» del estado de equilibrio y poco se preocupa de hacer un análisis cualitativo de la situación problemática a nivel macroscópico y microscópico. Por tanto, es de esperar que los estudiantes tengan dificultades para disponer de criterios macroscópicos que les permitan saber cuando se presenta un estado de equilibrio en un sistema químico y poder relacionarlos con su explicación microscópica.

– Otro aspecto resaltado en el trabajo de Gil (1996) nos propone orientar el tratamiento científico, del problema planteado, con la elaboración de estrategias para la contrastación de las hipótesis a la luz del cuerpo de conocimientos de que se dispone. Consideramos que se requiere entonces de los siguientes conocimientos y destrezas para favorecer la comprensión del concepto:

3) Saber dar una solución al problema planteado aplicando el modelo elemental de reacción a los dos procesos posibles y atribuyendo, a escala microscópica, un carácter dinámico al estado de equilibrio. Esta hipótesis implica considerar que se igualan las velocidades directa e inversa y, por tanto, no hay avance neto del proceso cuando se ha llegado al estado de equilibrio.

El estudiante ha de entender que la igualdad de velocidades en el estado de equilibrio no significa que la extensión de los procesos directo e inverso sea la misma. Ha de ver la necesidad de introducir un concepto nuevo, la constante de equilibrio K , que indique hasta donde puede progresar la reacción directa frente a la inversa si un sistema determinado alcanza el equilibrio (extensión final del proceso). Ha de saber derivar la definición operativa de esta constante K para cualquier proceso reversible, sea homogéneo o heterogéneo, y saber predecir en situaciones concretas si el sistema está o no en equilibrio. En particular, ha de reconocer que K sólo dependerá de la temperatura y del sistema químico representado en el esquema de reacción y, paradójicamente, no será función de las concentraciones en el equilibrio (puesto que es una constante).

De acuerdo con el operativismo frecuente en la enseñanza-aprendizaje de la química es de esperar que los estudiantes tengan dificultades para comprender el significado cualitativo de la constante de equilibrio respecto al grado de avance de la reacción directa frente a la reacción inver-

sa así como también el campo de validez de la constante de equilibrio (reducción funcional de los factores que influyen en K_c).

– Un cuarto aspecto resaltado por Gil (1996) consiste en plantear el manejo reiterado de los nuevos conocimientos en una variedad de situaciones para hacer posible la profundización y afianzamiento de los mismos. Los siguientes conocimientos y destrezas serán de utilidad para reforzar el aprendizaje del equilibrio químico:

4) Saber aplicar diversas estrategias para concluir cuál será el sentido de evolución de un sistema químico en equilibrio al que se le perturba (explicación a través del principio de Le Chatelier, teniendo en cuenta sus limitaciones, de la ley del equilibrio o, mejor aún, del análisis de las velocidades de reacción aplicando el modelo de colisiones).

Como consecuencia de un aprendizaje operativista, los estudiantes, en hipótesis, presentan la fijación funcional de aplicar el principio de Le Chatelier como forma de razonamiento de sentido común al proponerles cuestiones cualitativas sobre perturbación del equilibrio.

METODOLOGÍA

Para poner a prueba la existencia de estos obstáculos se empleó un diseño de enfoque múltiple y convergente conformado por dos encuestas y una entrevista, cuyos objetivos buscan explorar el conocimiento que los estudiantes tienen sobre: aspectos axiológicos del equilibrio químico, razones por las cuales unas sustancias reaccionan entre sí y otras no, explicación de qué es un equilibrio químico, interpretación microscópica de una situación de equilibrio, significados cualitativo y cuantitativo de la constante de equilibrio, campo de validez de la constante de equilibrio y perturbación del equilibrio. La primera encuesta se aplicó a 51 estudiantes seleccionados de 31 centros educativos de Valencia para las pruebas de la Olimpiada Química del curso 1995/96. La segunda encuesta fue aplicada a 46 estudiantes de dos cursos de un centro educativo de la misma ciudad y la entrevista fue realizada a 35 estudiantes pertenecientes a dos cursos de dos centros de la ciudad durante el curso académico 1999/00.

RESULTADOS

A continuación presentamos los principales obstáculos que consideramos se pueden presentar a los estudiantes en el aprendizaje del equilibrio químico y los resultados de algunos ítems del diseño experimental para poner a prueba la existencia de dichos obstáculos.

(a) ¿Saben los estudiantes a qué problemas o cuestiones relevantes intenta dar respuesta la introducción del concepto de equilibrio químico y qué interés puede tener su estudio? Se trata de aspectos epistemológicos y actitudinales que van en contra de una introducción arbitraria de los conceptos que intentan dar respuesta a aquella

pregunta y de una presentación desinteresada de los problemas científicos.

En el ítem de la primera encuesta («¿Porqué algunas sustancias reaccionan entre sí y otras no lo hacen?»), se quiere poner a prueba si los estudiantes saben que el problema estructurante que trata de resolver la idea de equilibrio químico es el de conocer las causas mediante las cuales explicamos por qué las sustancias reaccionan o interaccionan entre sí y dejan de hacerlo a pesar de que puedan seguir estando en el sistema químico.

Históricamente, las primeras explicaciones de las interacciones sustanciales se basaron en la idea de afinidad química de las sustancias, que sirvió de base para la principal obra de Berthollet *Essai de statique chimique*, publicada en 1803, donde expone su teoría de la acción química, introduce la noción de equilibrio químico, la noción de reacciones parciales y discute factores que afectan el equilibrio (Ganaras, 1998).

Una vez analizadas las respuestas del ítem citado en el párrafo anterior se encontró que ninguno de los estudiantes estableció relación entre la idea de equilibrio químico y la no reactividad de las sustancias, si bien el 19% de estos estudiantes dio alguna justificación de tipo energético. Por ejemplo, el siguiente razonamiento basado en el cambio de entalpía: *que la reacción suponga, al menos durante cierto tiempo, una manera de estabilización energética basada en la disminución de la energía potencial del sistema. Así si el O_2 y el H_2 reaccionan es solamente porque en el transcurso de la violenta reacción, se produce un desprendimiento de energía, que posibilita la estabilidad.*

Por otra parte el 20% de los estudiantes expresó razonamientos basados en la semejanza de las sustancias o la complementariedad de ellas, como por ejemplo en el siguiente caso: *«Algunas sustancias reaccionan entre sí, porque poseen propiedades que se complementan. Las fuerzas de atracción entre los electrones y protones de los átomos de los compuestos juegan un papel decisivo. Así, una sustancia que es muy electronegativa reaccionará ampliamente con una sustancia que no lo sea, un metal por ejemplo. Se producen reacciones entre los átomos de un elemento y los átomos de otro, como consecuencia de atracciones y repulsiones.*

La mayoría de las respuestas, 54%, se inclina por asociar la causalidad de las reacciones químicas a la unión entre átomos (tendencia a la formación de enlaces). Aquí se presenta una superposición entre los niveles macro y micro puesto que los alumnos identifican *sustancia* con *átomo* y tratan de justificar la formación de compuestos con la formación de enlaces entre átomos (para ellos, sustancias simples) y forman sustancias (compuestos) que identifican con moléculas. Por ejemplo en la siguiente respuesta: *El hecho de que una sustancia reaccione con otra es debido a sus electrones de valencia. Dos sustancias reaccionan para formar un compuesto o molécula más estable. Para conseguir la mayor estabilidad deben intentar alcanzar la estructura de gas noble, es decir completar su última capa de valencia.*

A pesar de tratarse de una muestra selecta, estudiantes seleccionados para las pruebas de la Olimpiada Química, con muy buena capacidad de argumentación, como se puede observar en los ejemplos citados, no muestran conocimiento del problema que pretende resolver el equilibrio químico. En conclusión, no es de extrañar que los estudiantes tengan dificultades para el aprendizaje del equilibrio químico si tenemos en cuenta que ni saben cuál es el interés que pueda tener su estudio ni saben cuál es el problema que se está abordando.

En el ítem 4 de la entrevista («Menciona, como mínimo, dos ejemplos de equilibrios químicos que creas que tengan interés»), se trata de conocer el grado de percepción que los alumnos tienen de las relaciones CTS del tema de equilibrio químico. Si el alumno ha estado motivado con el estudio del equilibrio químico, le será fácil dar respuestas rápidas y claras, de lo contrario tendrá dificultad para evocar algún ejemplo.

Con el fin de rebajar el nivel de exigencia en esta valoración, para ser positiva la respuesta, se considera la simple mención del ejemplo sin justificar cuáles son las sustancias implicadas en el sistema en equilibrio. Solo el 8% de los estudiantes mencionó dos ejemplos de equilibrios químicos, el 48% mencionó un ejemplo y los demás, (44%), no lograron mencionar ningún ejemplo.

Uno de los dos ejemplos más citados y que corresponde a una de las respuestas más explícitas que ha dado la muestra es la siguiente: *Pues creo que es un equilibrio químico lo del ozono, la formación y destrucción del ozono. Que es interesante porque es lo que nos protege.* Esta respuesta es, pues, representativa de las de mejor calidad dado que, al menos, relaciona la idea de equilibrio con la existencia de dos procesos antagónicos (formación y destrucción del ozono). En el análisis de las respuestas se ha visto que, en general, los estudiantes no conocen en profundidad ninguno de los ejemplos citados.

(b) ¿Saben los estudiantes explicar el comportamiento macroscópico de un sistema en equilibrio? Para tener este conocimiento, los estudiantes deben reconocer el comportamiento macroscópico de un sistema en equilibrio, y para ello han de disponer de criterios claros (reconocer empíricamente que a temperatura constante y sea cual sea el estado inicial del sistema se llega a una situación en la que, a pesar de que sigue habiendo reacción, la composición del sistema permanece constante a lo largo del tiempo, reacción no total).

Con el ítem 1 de la encuesta 2 y de la entrevista («Explica, tan extensamente como necesites, ¿qué es un equilibrio químico para ti?»), se pretende detectar qué ideas usan los alumnos en su argumentación sobre el concepto de equilibrio químico y conocer qué características y condiciones del estado de equilibrio mencionan los estudiantes en sus explicaciones.

Se encuentra un bajo porcentaje de alumnos (8%) que tienen claro cuáles son las características macroscópicas de una situación de equilibrio (proceso reversible y composi-

ción constante), como se puede ver en el siguiente ejemplo: *Pues cuando tenemos unas reacciones que son reversibles, que no se descomponen del todo sino que pueden, dependiendo del ambiente o del medio, volver otra vez al estado primario, pues cuando se encuentran en equilibrio es cuando ya no hay más reacción, cuando ya han llegado a un límite donde se encuentran en la proporción exacta en la que deben estar; entonces se mantiene y ya no se cambia la reacción, ya no va hacia un lado ni hacia otro sino ya se mantiene.*

Igualmente se encuentra bajo el porcentaje de alumnos (8%) que, además de considerar las características macroscópicas, explican microscópicamente el carácter dinámico del equilibrio, por ejemplo en la siguiente respuesta: *Pues el equilibrio es que se descompone la misma cantidad de productos que de reactivos, o sea, se van transformando al mismo nivel y a la misma velocidad productos y reactivos, entonces siempre hay la misma concentración de unos y de otros.* Se entiende que al decir que se siguen transformando a la misma velocidad productos y reactivos se está pensando en las interacciones entre partículas.

Aparece una categoría de respuestas (13%) que presenta la tendencia de los estudiantes a identificar el equilibrio con la constante de equilibrio, es decir con la ley de equilibrio (expresión matemática) que han utilizado operativamente los alumnos para resolver los problemas cuantitativos. Se trata de un aprendizaje memorístico de la ley de equilibrio (se asocia la idea cualitativa de equilibrio con la definición operativa de la constante de equilibrio), ya que desde la enseñanza se hace una introducción operativa del concepto carente de significado químico. Un ejemplo es la siguiente respuesta: *Pues un equilibrio químico es una forma de expresar en qué relación deben estar los reactivos y los productos para formar las cosas...*

Otra categoría de respuestas que aparece (13%), corresponde a la idea subyacente en los alumnos de que el equilibrio consiste en la posibilidad del desplazamiento del sistema en equilibrio, producto de un aprendizaje memorístico del principio de Le Chatelier. Veamos un prototipo de respuesta donde se observa esto: *Pues, en todos los equilibrios químicos pienso que debe de haber una temperatura, una presión, un volumen constantes, deben de ser constantes porque si no, no tendría sentido la palabra equilibrio, tienen que ser constantes, luego siempre debe de haber la misma posibilidad de que un reactivo se convierta en producto y que un producto se convierta en reactivo y eso significa que están en equilibrio, la misma palabra lo dice, hay tantas posibilidades de que pase una cosa como la otra, por eso se encuentran en equilibrio.*

Las otras categorías corresponden a las respuestas que solamente mencionaron una característica macroscópica, la existencia de un proceso reversible (8%) o la composición constante del sistema (29%), y respuestas consideradas incodificables (21%).

(c) ¿Saben los estudiantes explicar el carácter dinámico del equilibrio químico, el significado cualitativo de la constante de equilibrio, K , y su campo de validez? Los estudiantes deben saber explicar el carácter dinámico del equi-

libro con el modelo cinético elemental de reacción aplicado al proceso reversible que está ocurriendo (explicación de la contradicción aparente entre el nivel macro y el nivel micro, necesaria para evitar la superposición conceptual de estos dos niveles).

Con el ítem 3 de la encuesta 2 («El gas pentacloruro de fósforo, PCl_5 , se descompone a 30°C en los gases tricloruro de fósforo, PCl_3 , y cloro, Cl_2 . La reacción se lleva a cabo en un erlenmeyer cerrado. Al cabo de un tiempo se comprueba que aún hay bastante PCl_5 sin descomponer y que esta cantidad se mantiene. ¿Cómo se explica que la descomposición del PCl_5 no continúe si el sistema sigue estando a 30°C ?»), se busca ver la capacidad de los estudiantes para relacionar el comportamiento macroscópico del sistema en equilibrio con la explicación microscópica del mismo.

Se encuentra muy bajo el porcentaje de estudiantes (7%) que relacionan el comportamiento macroscópico del sistema en equilibrio con una explicación microscópica. Con el fin de bajar el nivel de exigencia en las respuestas de esta categoría, consideramos también aceptables aquellas respuestas que solo hagan mención de la igualación de las velocidades de los dos procesos antagónicos o el carácter dinámico del equilibrio (aunque no hagan mención explícita del modelo elemental de reacción). Por ejemplo la siguiente respuesta: *Porque se ha alcanzado el equilibrio en la reacción; existe la misma cantidad de PCl_5 que se descompone en PCl_3 y Cl_2 que la cantidad de PCl_3 y Cl_2 que reaccionan para formar PCl_5 (es decir, la reacción se desarrolla en ambos sentidos a la misma cantidad y velocidad).*

Aparece un número considerable de respuestas (52%) que sólo tienen en cuenta la explicación macroscópica en el sentido de que las sustancias reaccionan hasta alcanzar un estado final de equilibrio en el cual el sistema no cambia aunque quedan sustancias que pueden interaccionar (ideas de reacción no total y constancia de la composición). Por ejemplo la siguiente respuesta: *Esto quiere decir que el sistema ha alcanzado el equilibrio. Al descomponerse en un erlenmeyer cerrado a 30°C el compuesto no se descompone en su totalidad, sólo se descompone hasta que el gas alcance la presión que hay en el recipiente.*

Las demás respuestas se pueden considerar incodificables, ya que no aportan ninguna explicación válida. Por tanto, se observa que la enseñanza debe insistir más en el tratamiento cualitativo de la situación de equilibrio.

Con el ítem 8 de la entrevista («Se hicieron varios experimentos a determinada temperatura para determinar la constante de equilibrio, K , de la reacción $\text{N}_2\text{O}_{4(g)} \rightleftharpoons 2\text{NO}_{2(g)}$. Se encontró que el valor de K es 0,2. Explica qué significa este valor de la constante de equilibrio.»), se trata de detectar qué significa para los alumnos el valor de la constante de equilibrio.

Se encuentra muy bajo el porcentaje de estudiantes, 11%, que expresan el significado correcto de la constante de equilibrio en cuanto hacen alguna referencia a la extensión de la reacción directa frente a la extensión de la reac-

ción inversa, por ejemplo la siguiente respuesta: *Que el equilibrio no está muy desplazado en ninguno de los dos sentidos y que no tiende a irse hacia ninguno de los lados en particular.*

En cambio aparece un elevado número de respuestas, 72%, que muestra la visión operativa que tienen los estudiantes de la constante de equilibrio K , bien haciendo referencia a la relación entre cantidades de productos y reactivos como en el siguiente caso: *Que la cantidad de productos es casi igual a la de reactivos y por eso da 0,2, no hay mucha diferencia entre las dos*, o bien refiriéndose más concretamente a la expresión matemática de K : *Al hacer el valor de K el segundo término va al cuadrado y por eso es menor que el primero, porque da 0,2 que es la división entre el segundo al cuadrado dividido el primero.*

Entre las demás respuestas, unas identifican la constante de equilibrio con la velocidad de reacción, por ejemplo en el siguiente caso: *Pues el valor este quiere decir que más o menos van a la misma velocidad hacia el producto que hacia el reactivo o sea que más o menos se va consumiendo lo mismo que se produce*, y otras identifican K con la concentración de las sustancias, por ejemplo: *Supongo que será a cada temperatura los moles que reaccionan son esos por cada litro de mezcla.*

Con el ítem 4 de la encuesta 2 («La ley del equilibrio químico se aplica a cada reacción química y se concreta en la denominada ‘constante de equilibrio’. ¿De qué factores crees que depende esta constante de equilibrio?»), se quiere valorar si los estudiantes saben que la constante de equilibrio depende de la naturaleza de las sustancias que interaccionan (no sólo de los reactivos sino también de los productos) y, en particular, de la forma en que se simbolice la interacción sustancial y de la temperatura a la cual se realiza el proceso.

Se encontró que el 7% de los estudiantes consideran solamente la temperatura como factor del cual depende la constante de equilibrio. Con el fin de ser más amplios en la aceptación de las respuestas consideramos estas respuestas correctas suponiendo que llevan implícito el conocimiento del esquema de la reacción (de hecho, todos los estudiantes utilizan el esquema de reacción cuando tienen que hacer cálculos de equilibrio químico). Veamos una respuesta prototípica de esta categoría: *La K_c depende únicamente de la temperatura.*

Por otra parte, un alto porcentaje de estudiantes, 45%, considera que la constante de equilibrio depende de la concentración de las sustancias y de otras variables (el 33% incluye la temperatura), es decir existe en los estudiantes la idea de que K no es una constante sino una función de otras variables como se puede observar en la siguiente respuesta: *La constante de equilibrio depende prioritariamente de la concentración de las sustancias que toman parte en una reacción química (reactivos y productos). Pero a su vez la concentración depende de otras variables o magnitudes físicas como el volumen, la cantidad, etc.».*

Las demás respuestas son algunas que no mencionan ni la temperatura ni la concentración, como por ejemplo: *Un*

factor del que depende son los catalizadores, estos son la velocidad de la reacción con que llegan al estado de equilibrio», y otras respuestas que mencionan la temperatura y otras variables pero no la concentración.

Consideramos importante destacar que, del total de respuestas, el 32% no tiene en cuenta la temperatura debido probablemente a un caso de *reducción funcional* que lleva a los estudiantes a considerar que K no depende de la temperatura, porque la temperatura no aparece en la fórmula de K (Viennot, 1992). De la misma manera, el alto número de respuestas que consideran que la constante de equilibrio depende de la concentración puede deberse a un caso de *fijación funcional*, al considerar a K como una función de las variables que aparecen en su fórmula matemática y no como lo que realmente es, una constante.

Como se ha podido observar, los estudiantes aprenden muy poco sobre el significado cualitativo de la constante de equilibrio en cuanto al grado de avance de la reacción directa respecto al grado de avance de la reacción inversa, a una temperatura determinada, y lo mismo, muy poco aprenden sobre el campo de validez de K , pero en cambio aprenden bien la definición operativa de la constante de equilibrio y su aplicación en problemas cuantitativos, como consecuencia del operativismo imperante en la enseñanza de la química.

(d) ¿Qué estrategias utilizan los estudiantes en las cuestiones cualitativas sobre perturbaciones del equilibrio? Con el ítem 7 de la entrevista («Empleando un razonamiento diferente al del principio de Le Chatelier, cómo puedes explicar el sentido de evolución del equilibrio $\text{PCl}_{5(g)} \rightleftharpoons \text{PCl}_{3(g)} + \text{Cl}_{2(g)}$, si agregamos $\text{PCl}_{5(g)}$ al sistema a V y T constante?»), se trata de verificar si el alumno utiliza alguna estrategia diferente al principio de Le Chatelier para explicar el efecto de un cambio de concentración sobre un sistema en equilibrio.

Se ha elegido esta perturbación del equilibrio por ser la más sencilla de razonar desde el punto de vista cinético y donde es común que se presente la fijación funcional de dicho principio, como forma de razonamiento, que puede estar basada en una metodología de sentido común caracterizada por la certidumbre, por contestaciones rápidas y seguras, por la ausencia de dudas en sus razonamientos y la no consideración de soluciones alternativas (Furió, 1997).

Solamente el 6% de los alumnos utilizó la teoría de los choques eficaces para explicar sus respuestas, veamos el siguiente ejemplo: *Al haber más concentración de las moléculas de pentacloruro hay más posibilidad de que choquen entre ellas y de que choquen con las demás partículas del equilibrio, por eso va la reacción hacia la derecha, porque al haber más choques se dividen las moléculas, al haber más moléculas es más fácil que choquen para que se dividan, la frecuencia es mayor.* Con este bajo porcentaje, nuevamente se confirma que los estudiantes no establecen relación entre el comportamiento macroscópico de un sistema en equilibrio y la reversibilidad microscópica.

Un número considerable de alumnos, 46%, utiliza correctamente como estrategia la comparación de la constante de equilibrio con el cociente de reacción para explicar el efecto del cambio de concentración sobre el sistema en equilibrio, por ejemplo en la respuesta: *Si se le añade PCl_3 , entonces la Q tiene que ser menor que la constante de equilibrio, entonces para que se compense los productos tienen que aumentar y entonces la reacción va para la derecha.*

A pesar de haberse solicitado en el enunciado utilizar una estrategia diferente al principio de Le Chatelier, un número apreciable de alumnos, 37%, lo utiliza en sus respuestas lo cual muestra la *fijación funcional* que tienen los alumnos en la utilización de este principio, veamos el siguiente ejemplo: *El sistema evoluciona hacia la derecha porque aumenta la cantidad que se encuentra en la izquierda y entonces va hacia el otro lado y como el volumen y la temperatura pues son constantes, tiene que ir en esa dirección.* Las demás respuestas se clasificaron como incodificables por no corresponder a ninguno de los indicadores considerados como significativos.

CONCLUSIONES

Al analizar la información obtenida con las encuestas y entrevistas citadas anteriormente, encontramos que el aprendizaje conseguido por los estudiantes ha sido bastante pobre en la comprensión de los siguientes aspectos que consideramos importantes porque podrían facilitar el aprendizaje del equilibrio químico:

a) Los estudiantes desconocen a qué problema intenta dar respuesta la introducción del tema de equilibrio químico, ya que ninguno logra relacionar la no reactividad de las sustancias (o la reactividad hasta un momento en el cual las sustancias dejan de reaccionar quedando aún reactivos presentes) con la idea de equilibrio químico, muestran poca capacidad para identificar ejemplos de situaciones de equilibrio que les representen algún interés.

b) Los estudiantes, en muy bajo porcentaje (8%), logran precisar las características macroscópicas y las características microscópicas, así como la relación entre estos dos niveles, en una situación de equilibrio químico, propiedades necesarias para lograr un mejor aprendizaje del concepto. Con frecuencia se identifica la idea de equilibrio químico con los cálculos de la ley del equilibrio o con la utilización ciega del principio de Le Chatelier para deducir hacia dónde evoluciona un sistema en equilibrio que ha sido perturbado.

c) En general, los estudiantes muestran muy poco dominio en el manejo cualitativo de los aspectos del equilibrio químico, debido probablemente a que la enseñanza insiste en la visión operativista del concepto. Por ejemplo, sólo el 11% de los estudiantes expresó el significado cualitativo de la constante de equilibrio, mientras el 72% se limitó a dar explicaciones puramente operativas como relación entre cantidades de productos y reactivos o expresiones de la

fórmula matemática de la constante de equilibrio. En cuanto al campo de validez de la constante de equilibrio, pocos estudiantes (7%) reconocen que K depende de la temperatura y de la forma como se representa la reacción química (este bajo porcentaje se debe probablemente a una reducción funcional sobre la expresión de la constante de equilibrio donde no aparece T); en cambio, un alto porcentaje (45%) cree que K depende de la concentración de las sustancias (debido probablemente a una fijación funcional de la expresión de la constante de equilibrio donde aparece la concentración).

d) En las cuestiones cualitativas sobre perturbaciones del equilibrio volvemos a encontrar el poco énfasis que hace la enseñanza en explicaciones cualitativas; así es como solamente el 6% de los estudiantes dio explicaciones a nivel microscópico mientras el 46% prefirió la definición

operativa de K (comparación con el cociente de reacción) y el 37% utilizó el principio de Le Chatelier (confirmándose la fijación funcional que existe en el uso de este principio como única estrategia para explicar el sentido de evolución de un sistema químico en equilibrio cuando se perturba externamente).

Finalmente, ante estos resultados y como un reto para el futuro cercano, nos preguntamos si es posible elaborar diseños fundamentados didácticamente que logren que los alumnos comprendan cualitativa y cuantitativamente el equilibrio químico y vean su aplicabilidad en resolver problemas de la vida cotidiana (como son, por ejemplo, el mal de altura, problemas que se pueden presentar al hacer submarinismo, optimizar la fabricación de materias primas para obtener abonos nitrogenados, o, simplemente, comprender cómo podemos obtener agua carbonatada, etc.).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSUBEL, D.P., NOVAK, J.D. y HANNESIAN, L.H. (1993). *Psicología Educativa. Un punto de vista cognoscitivo*. Méjico. Trillas.
- ANDERSSON, B. (1986). Pupils' Explanations of Some Aspects of chemical Reactions. *Science Education*, 70 (5), pp. 549-563.
- BANERJEE ANIL, C. (1991). Misconceptions of students and teachers in chemical equilibrium. *Int. J. Sci. Ed.*, vol. 13 (4), pp. 487-494.
- BERGQUIST W. y HEIKKINEN H. (1990). Student Ideas Regarding Chemical Equilibrium, *Journal of Chemical Education*, vol. 67 (12), pp. 1000-1003.
- CARRASCOSA ALÍS, J., FURIÓ MÁ, C. y VALDÉS CASTRO, P. (1996). Las concepciones alternativas de los estudiantes y sus implicaciones didácticas. En *Temas escogidos de la Física y la Química*. Editorial Pueblo y Educación. La Habana.
- FURIÓ MÁ, C. J. (1996). Las concepciones alternativas del alumnado en ciencias: dos décadas de investigación. Resultados y tendencias. *Alambique*, 7, pp. 7-17.
- FURIÓ, C. y ORTIZ, E. (1983). Persistencia de errores conceptuales en el estudio del equilibrio químico. *Enseñanza de las Ciencias*, 1 (1), pp. 15-20.
- FURIÓ, C. y ESCOBEDO, M. (1994). La fijación funcional en el aprendizaje de la química. Un ejemplo paradigmático: usando el principio de Le Chatellier. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*, 8, pp. 109-124.
- FURIÓ, C., CALATAYUD, M.L., BÁRCENAS, S.L. y PADILLA, O.M. (2000). Functional fixedness and functional reduction as common sense reasonings in chemical equilibrium and in geometry and polarity of molecules. *Science Education*, 84 (5), pp. 545-565.
- GABEL, D. (1998). The Complexity of Chemistry and Implications for Teaching. En B. J. Frazer y K.G. Tobin (Eds), *International Handbook of Science Education*, pp. 233-248.
- GANARAS, K. (1998). *La conceptualisation des equilibres chimiques*. These de Doctorat. Ecole Normale Supérieure de Cachan. France.
- GARNET, P.J., GARNET, P. J. y HACKLING, M. W. (1995). Students' Alternative Conceptions in Chemistry: A Review of

-
- Research and Implications for Teaching and Learning. *Studies in Science Education*, 25, pp. 69-95.
- GIL-PERÉZ, DANIEL. (1996). New Trends in science education. *Int. J. Sci. Educ.*, 18(8), pp. 889-901.
- GORODETSKY, M. y GUSSARSKY, E. (1986). Misconceptualization of the chemical equilibrium concept as revealed by different evaluation methods. *Eur. J. Sci. Educ.*, 8 (4), pp. 427-441.
- HACKLING, M.W. y GARNETT, P.J. (1985). Misconceptions of Chemical Equilibrium, *Eu. J. Sci. Educ.*, 7(2), pp. 205-214.
- HASHWEH, M.Z. (1986). Towards an Explanation of Conceptual Change. *Eu. J. Sci. Educ.*, 8(3), pp. 229-249.
- HEWSON, P.W., BEETH, M. E. y THORLEY, N. R. (1998). Teaching for Conceptual Change. En B. J. Frazer y K.G. Tobin (Eds), *International Handbook of Science Education*, pp. 199-218.
- JOHNSTONE, A., MACDONALD, J. y WEBB, G. (1977). Chemical equilibrium and its conceptual difficulties. *Education in Chemistry*, 14 (6), pp. 169-171.
- LARCHER, C. (1994). Point de Vue Á propos des Équilibres Chimiques. *Aster*, 18.
- NAKHLEH, M.B. (1992). Why Some Students Don't Learn Chemistry. *J. Chem. Educ.* 69 (3), pp. 191-196.
- QUÍLEZ, J. (2002). Aproximación a los orígenes del equilibrio químico: algunas implicaciones didácticas. *Educación Química*, 13 (2), pp. 101-112.
- QUÍLEZ, J. y SANJOSE, V. (1995). Errores Conceptuales en el Estudio del Equilibrio Químico: Nuevas Aportaciones Relacionadas con la Incorrecta Aplicación del Principio de Le Chatelier. *Enseñanza de las Ciencias*, 13(1), pp. 72-79.
- STAVRIDOU, H. y SOLOMONIDOU, C. (2000). Représentations et conceptions des élèves grecs par rapport au concept d'équilibre chimique. *Didaskalia*, 16, pp. 107-134.
- TREAGUST, D., DUIT, R. y NIESWANDT, M. (2000). Sources of students' difficulties in learning chemistry. *Educación Química*, 11 (2), pp. 228-235.
- VAN DRIEL, J.H., DE VOS, W., VERLOOP, N. y DEKKERS, H. (1998). Developing secondary students conceptions of chemical reactions: the introduction of chemical equilibrium. *Int. J. Sci. Educ.*, 20 (4), pp. 379-392.
- VIENNOT, L. (1992). Raisonnement à plusieurs variables: Tendances de la pensée commune. *Aster*, 14, pp. 127-141.
- WANDERSEE, J.H., MINTZES, J.J. y NOVAK, J. D. (1994). Research on alternative conceptions in Science. *Handbook of Research on Science Teaching and Learning* (Macmillan Pub. Co.: Nueva York). Gabel D.L. (Editor).
- WHEELER, A. y KASS, H. (1974). Student Misconceptions in Chemical Equilibrium as Related to Cognitive Level and Achievement. Paper presented at the Annual Meeting of the National Association for Research in Science Teaching (74th, Chicago, Illinois, April 1974).